

METODYKA DIAGNOZOWANIA STANU MASZYN¹

Henryk Tylicki, Joanna Wilczarska, Marzena Bartol

Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono problematykę badania jakości procesu wyznaczania testów i programów diagnostycznych stanu technicznego maszyn. Zaprezentowano także algorytmy wyznaczania testów i programów diagnostycznych stanu technicznego maszyn.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, diagnozowanie stanu maszyn, optymalizacja procesu oceny stanu maszyn

WSTĘP

Maszyny w każdej chwili znajdują się w pewnym określonym stanie, a sekwencje czasowe tych stanów rozpatruje się jako czas ich istnienia. W przypadku odpowiedzi na pytanie dotyczące obecnego stanu maszyny należy rozwiązać zadanie kontroli stanu i lokalizacji uszkodzenia, polegające na określeniu stanów układów i zespołów maszyny, które obecnie istnieją z ewentualnym próbą odpowiedzi, co jest przyczyną zaistnienia tych stanów. Synergia obu tych zadań stanowi przedmiot oceny stanu technicznego maszyny w chwili jej badania. Główne problemy pojawiające się przy rozwiązaniu tych zadań są następujące:

- a) sformułowanie celu oceny stanu technicznego maszyny i określenie postaci diagnozy;
- b) zmiana stanu technicznego pojazdu w czasie eksploatacji;
- c) opis stanu technicznego pojazdu za pomocą cech stanu oraz zależność pomiędzy cechami stanu i parametrami diagnostycznymi;
- d) rozwiązanie zadania oceny stanu:
 - wybór parametrów diagnostycznych opisujących aktualny stan i jego zmianę w czasie eksploatacji maszyny,
 - wyznaczenie diagnozy stanu maszyny,
 - wykorzystanie informacji diagnostycznej do podjęcia decyzji o zakresie obsłużenia maszyny.

¹ Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu badawczego nr 4 T07B 033 26.

Pojęcie „najlepsze” wiąże się z przyjęciem odpowiednich kryteriów i rozpatrzeniem tych problemów w kategoriach poszukiwania rozwiązania optymalnego. Formułując zadanie optymalizacyjne, najczęściej posługujemy się wieloma kryteriami oceny, co determinuje rozpatrzenie tych problemów w kategoriach rozwiązania polioptymalnego.

WYZNACZANIE ZBIORU PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Zbiór parametrów diagnostycznych wyróżnia się ze zbioru parametrów wyjściowych. Na ogół przyjmowanymi kryteriami są warunki niezależności, jednoznaczności i mierzalności parametrów. Należy traktować je jednak jako warunki wstępne.

Analizując prace z zakresu eksploatacji maszyn dotyczące problemu redukcji liczby parametrów diagnostycznych, spotyka się takie, w których podejmuje się problem optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych dla potrzeb rozpoznawania stanu maszyn [Żółtowski 1996, Tylicki 1998, Niziński i Michalski 2002]. Z przeprowadzonych badań [Surówka 2001, Tylicki 1998], mających na celu potwierdzenie niektórych propozycji zawartych w tych pracach wynika, że wyznaczanie zbioru parametrów diagnostycznych w procesie oceny stanu maszyny powinno uwzględniać:

- a) zdolność odwzorowania zmian stanu maszyny w czasie eksploatacji;
- b) ilość informacji o stanie maszyny;
- c) odpowiednią zmienność wartości parametrów diagnostycznych w czasie eksploatacji maszyny.

Dlatego odpowiednie algorytmy uwzględniające te postulaty zostały przedstawione jako metody, które opracowano i zweryfikowano [Surówka 2001, Tylicki 1998]. Są to:

- a) minimalnego błędu diagnozy;
- b) pojemności informacyjnej;
- c) korelacji ze stanem technicznym;
- d) podobieństwa wartości parametrów diagnostycznych.

Metody te wykorzystują przyporządkowane sobie kryteria:

- a) minimalnego błędu diagnozy; wyróżnia te parametry, które charakteryzują się minimalnym błędem diagnozy;
- b) maksymalnej pojemności informacyjnej; wyróżnia te parametry, które charakteryzują się maksymalną wrażliwością na zmianę stanu technicznego układu hydraulicznego;
- c) korelacji ze stanem technicznym; wyróżnia te parametry, które charakteryzują się maksymalną wartością współczynnika korelacji między parametrami diagnostycznymi i stanami technicznymi układu;
- d) klasyfikacji stanów; wyróżnia te parametry, które charakteryzują się maksymalną rozdzielczością między stanami technicznymi układu.

Metoda minimalnego błędu diagnozy polega na określeniu tzw. obszaru „przykrycia” funkcji gęstości prawdopodobieństwa warunkowego parametru $y_j \in Y$ (rys.1) określanego przez Serdakowa [Niziński i Michalski 2002] zależnością:

$$D = P(S_1 / y_j) \cdot Q_1 + P(S_2 / y_j) \cdot Q_2 \quad (1)$$

zaś prawdopodobieństwo błędu I rodzaju, polegającego na zaliczeniu obiektu będącego w stanie zdatności S_1 do stanu niezdatności S_2

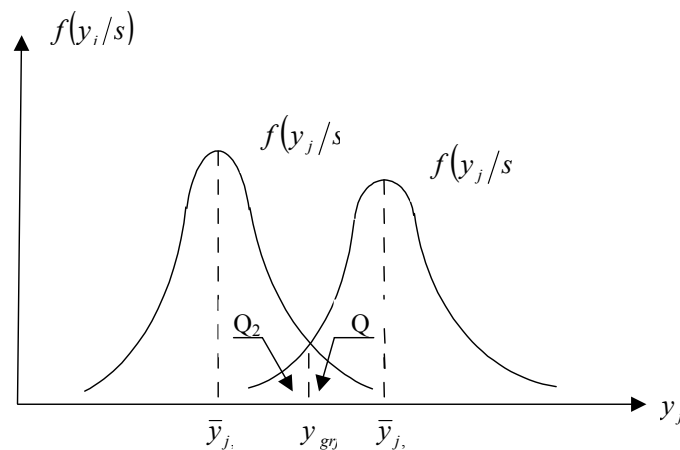
$$Q_1 = \int_{y_{gr}}^{\infty} f(y_j / S_1) dy_j \quad (2)$$

oraz prawdopodobieństwo błędu II rodzaju, polegającego na zaliczeniu obiektu będącego w stanie zdatności S_2 do stanu niezdatności S_1

$$Q_2 = \int_{-\infty}^{y_{gr}} f(y_j / S_2) dy_j \quad (3)$$

Wybór „najlepszego” parametru $y^* \in Y$ odbywa się poprzez minimalizację błędu diagnozy:

$$y^* = \min_j (D_j) \quad (4)$$



Rys. 1. Graficzna interpretacja błędu diagnozy [Surówka 2001]

Fig. 1. A graphic interpretation of a diagnosis error

Procedura wyboru parametrów diagnostycznych według przedstawionej metody sprowadza się wówczas do:

1. Analizy jakościowej parametrów, polegającej na:
 - a) badaniu istotności zmian wartości parametrów przy zmianie stanu technicznego zespołów i układów maszyny,
 - b) wyznaczeniu i szacowaniu wartości granicznych y_{gr} wg kryterium najmniejszego ryzyka Bayesa przy założeniu kosztów błędów I i II rodzaju.

2. Analizy ilościowej, która polega na wyborze parametrów diagnostycznych pod kątem kryterium minimalnego błędu diagnozy. W wyniku jej realizacji uzyskuje się zbiór parametrów diagnostycznych, którego elementy charakteryzują się dobrymi właściwościami rozdzielczymi oraz określone są przedziały ich zmian przy zmianie stanu technicznego maszyny oraz wartości graniczne $y_{grj}(y_{grd}, y_{grg})$ wraz z błędami diagnozy.

Metoda korelacji ze stanem technicznym maszyny polega na tym, że ze zbioru parametrów Y wybiera się takie, które charakteryzują się największą wartością wskaźników parametru d_j . Definiuje się go jako:

$$a_j = \frac{K_j}{c_j} \quad (5)$$

gdzie:

a_j – wskaźnik wrażliwości parametru,

k_j – liczba informacji o zmianie stanu technicznego układu.

$$k_j = \sum_{i=1}^k M[i, j], i = \overline{1, k}, j = \overline{1, m} \quad (6)$$

$M[i, j] = 1$, gdy $y_j \in Y$ zmienia się istotnie w przypadku wystąpienia $s_j \in S$

$M[i, j] = 0$, gdy $y_j \in Y$ nie zmienia się istotnie w przypadku wystąpienia $s_j \in S$

c_j – koszt sprawdzenia wartości parametru $y_j \in Y$, $c_j \in [1, 100]$

Wybór „najlepszego” parametru $y \in Y$ sprowadzi się wówczas do określenia maksymalnej wartości a_j , czyli:

$$y^* = \max_j (a_j) \quad (7)$$

Następnie dla tak wybranych parametrów diagnostycznych określa się wartości graniczne y_{gr}^* (o ile nie podaje ich producent, $y_{gr}^* \in Y_{gr}$). W wyniku realizacji tej metody uzyskuje się zbiór parametrów diagnostycznych, którego elementy charakteryzują się największą wrażliwością na wystąpienie stanów technicznych zespołów układu hydraulicznego oraz określone są przedziały ich zmian i wartości graniczne $y_{gr}^*(y_{grd}^*, y_{grg}^*)$ wraz z błędami diagnozy.

Metoda rozróżnialności stanów polega na wyborze takich parametrów diagnostycznych, które dla poszczególnych stanów technicznych przy zadanym poziomie ufności α są najbardziej rozróżnialne. W przypadku wyboru parametru do testu diagnostycznego kontroli stanu zespołów układu hydraulicznego rozróżnialność stanów

definiuje się jako „odległość” $d(t_1(y_j), t_i(y_j))$ między podziałami ufności parametru $y_j \in Y$ w stanie zdatności $s_0 \in S$ i stanie niezdatności $s_i \in S$, czyli wybór parametru „najlepszego” sprowadzi się do wyboru takiego $y^* \in Y$, który spełnia relację:

$$y_{\hat{D}_{KS}}^* = \max_{j=1,m} \left[\min_{i=1,k} d(t_0(y_j), t_i(y_j)) \right] \quad (8)$$

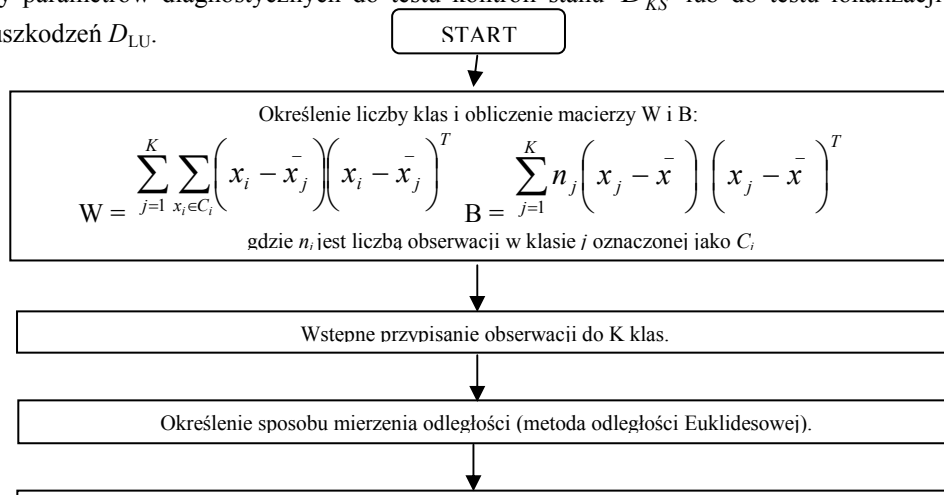
W przypadku wyboru parametrów do lokalizacji uszkodzeń w obiekcie, rozróżnialność stanów charakteryzuje się jako „odległość” $d(t_l(y_j), t_n(y_j))$ między przedziałami ufności parametru $y_j \in Y$ dla stanu niezdatności $s_l \in S$ i stanu niezdatności $s_n \in S$, czyli wybór parametru „najlepszego” sprowadzi się do wyboru takiego $y^* \in Y$, który spełnia relację:

$$y_{\hat{D}_{LU}} = \max_{j=1,m} \left[\min_{\substack{l=1,k \\ n=1,k \\ l \neq n}} d(t_l(y_j), t_n(y_j)) \right] \quad (9)$$

W wyniku realizacji tej metody uzyskuje się zbiór parametrów diagnostycznych, którego elementy charakteryzują się największą rozróżnialnością stanów do potrzeb testu kontroli stanu obiektu D_{KS} , jak i też do potrzeb programu lokalizacji uszkodzeń D_{LU} . Ponadto określone zostaną wartości graniczne y_{grg} , y_{grd} wybranych parametrów diagnostycznych.

Metoda podobieństwa wartości parametrów diagnostycznych polega na sprawdzeniu poprawności przyporządkowania obserwacji wartości parametrów diagnostycznych do poszczególnych klas stanu układu hydraulicznego. Wykorzystuje się tu zależność, że macierz całkowitej sumy kwadratów odchyleń obserwacji od środka ciężkości obserwacji T jest sumą całkowitej sumy kwadratów W odchyleń od średnich wewnątrzklasowych i całkowitej sumy kwadratów odchyleń średnich wewnątrz klasowych od średniej globalnej B . Algorytm klasyfikacji obserwacji wartości parametrów diagnostycznych na klasy przedstawiono został na rys. 2.

W metodzie tej bada się szybkość spadku pewnej funkcji wariancji uogólnionej lub całkowitej, obliczonej na podstawie W . Zakończenie procesu klasyfikacji, tj. przypisanie poszczególnych obserwacji do klas następuje po osiągnięciu wartości minimum dla kryterium globalnego. W wyniku realizacji metody otrzymuje się odpowiednio zbiory parametrów diagnostycznych do testu kontroli stanu D_{KS} lub do testu lokalizacji uszkodzeń D_{LU} .



Rys. 2. Algorytm metody podobieństwa wartości parametrów diagnostycznych [Surówka 2001]
Fig. 2. An algorithm of the diagnostic parameters simulation method

Metoda maksymalnej pojemności informacyjnej parametru diagnostycznego polega na wyborze parametru dostarczającego największą ilość informacji o stanie maszyny. Parametr diagnostyczny ma tym większe znaczenie w określeniu zmiany stanu, im silniej jest z nim skorelowany i im słabiej jest skorelowany z innymi parametrami diagnostycznymi. Zależność tę przedstawia się w postaci wskaźnika integralnej pojemności parametru diagnostycznego h_j , który jest modyfikacją dokonaną dla potrzeb redukcji parametrów diagnostycznych w procesie rozpoznawania stanu podobnego wskaźnika, odnoszącego się do zbioru zmiennych objaśniających model ekonometryczny:

$$h_j = \frac{r_j^2}{1 + \sum_{i,j=1}^m |r_{i,j}|} \quad (10)$$

gdzie:

$r_j = r(W, y_j); j = 1, \dots, m$ – współczynnik korelacji liniowej między zmiennymi W (stan zespołu maszyny) i y_j
 $r_{i,j} = r(y_i, y_j); i, j = 1, \dots, m; i \neq j$ – współczynnik korelacji liniowej między zmiennymi y_i i y_j .

W przypadku braku danych ze zbioru W , proponuje je zastąpić, przy założeniu, że wyznaczenie diagnozy jest realizowane w przedziale zużycia normalnego przebiegiem maszyny. Wówczas $r_j = r(t_i, y_j); j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, K$ (r_j – współczynnik korelacji liniowej między zmiennymi $t_i \in (t_1, t_b)$, t_i – przebieg pojazdu i y_j). Wybór parametru y^* do zbioru parametrów diagnostycznych sprowadza się wówczas do maksymalizacji wskaźnika h_j .

Zaletą przedstawionych metod jest to, że pozwalają wybrać ze zbioru parametrów wyjściowych jednoelementowe, jak i wieloelementowe zbiory parametrów diagnostycznych. Zbiór jednoelementowy odnosi się do przypadku, gdy pojazd jest zdekomponowany na układy i zespoły oraz konieczny jest wybór jednego parametru diagnostycznego. Zbiór wieloelementowy otrzymuje się, gdy w przedstawionych procedurach stosuje się mniej ostre ograniczenie, polegające na zakwalifikowaniu do zbioru parametrów diagnostycznych tych, których wartości wskaźników są większe (mniejsze) od przyjętych odpowiednio dla metody małych (dużych) liczb dodatnich.

Reasumując, najbardziej dokładna i wiarygodna jest metoda minimalnego błędu diagnozy. Wymaga ona jednak odpowiednich zbiorów danych w postaci macierzy obserwacji $Y = f(S)$, co generuje konieczność przeprowadzenia eksperymentu czynnego. Wady tej nie ma metoda podobieństwa wartości parametrów, bowiem po przyporządkowaniu jej do klasyfikacji stanów (zbiór stanów według bezpieczeństwa pracy układu), obok zalety korelacji stanu układu hydraulicznego z czasem eksploatacji maszyny roboczej, metoda ta jest najmniej wymagająca w aspekcie kłopotliwego, a niekiedy niemożliwego (w przypadku układu hydraulicznego maszyny roboczej) trybu realizacji eksperymentu czynnego. Możliwa jest jej realizacja w przypadku eksperymentu biernego.

WYZNACZENIE TESTU DIAGNOSTYCZNEGO KONTROLI STANU I LOKALIZACJI USZKODZEŃ

Z analizy możliwości badania zależności parametru diagnostycznego od stanu układów i zespołów maszyn [Tylicki 1998, Surówka 2001, Niziński i Michalski 2002] wynika, że najbardziej interesujące są metody wyznaczania testów kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń wykorzystujące Boolowską macierz obserwacji oraz macierz obserwacji parametru – czas eksploatacji maszyny roboczej.

Metoda macierzy Boolowskiej zapewnia wyznaczenie testu kontroli stanu D_{KS} i testu lokalizacji uszkodzeń D_{LU} . W pierwszym przypadku na podstawie macierzy binarnej M_b^d należy utworzyć macierz Boolowską M_b^{KS} do kontroli zdolności, w której w miejsce stanów wprowadza się podzbiór par rozróżnialnych stanów $S_o, S_i, i = \overline{1, k}$, o postaci:

$$M_b^{KS} = \begin{matrix} & & y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m \\ \begin{matrix} S_o, S_1 \\ S_o, S_2 \\ \vdots \\ S_o, S_i \\ \vdots \\ S_o, S_k \end{matrix} & \left[\begin{array}{c} | \\ | \\ | \\ \text{-----} \\ | \end{array} \right] \end{matrix} \quad (11)$$

$$M_{bij}^{KS} = \begin{cases} 0, & \text{gdy } (1 - M_{bij}^d) = 0 \\ 1, & \text{gdy } (1 - M_{bij}^d) = 1 \end{cases} \quad (12)$$

Występujące w elementach macierzy $M_{bij}^{KS} \in M_b^{LU}$ jedynki oznaczają rozróżnialność stanu $s_i \in S$ przy pomocy parametru $y_j \in Y$, zaś zera – nierozróżnialność. Analizując następnie macierz M_b^{LU} , do testu D_{LU} wybiera się taki parametr $y_j \in Y$, który w kolumnie ma maksymalną liczbę jedynek. W przypadku, gdy j -ta kolumna nie zawiera samych jedynek, należy szukać brakujących jedynek w n -tej kolumnie lub w $n + 1$ kolumnie. W przypadku ich występowania, dołącza się n -ty i $n + 1$ -ty parametry do testu D_{LU} . Wówczas test D_{LU} przyjmuje postać:

$$D_{LU} = \{y_j, y_n, y_{n+1}\} \quad (13)$$

$$D_{LU} = \{d_j, d_n, d_{n+1}\} \quad (14)$$

gdzie:

d_j – sprawdzenie j -tego parametru diagnostycznego

Metoda klasyfikacji stanów maszyn polega na tym, iż w wyniku wyznaczenia zbioru parametrów diagnostycznych za pomocą metody podobieństwa wartości podobieństwa stanów uzyskuje się pary relacji: stan zdatności S^0 – stany niezdatności S_i , $i = \overline{1, k}$, co pozwala określić zbiór parametrów diagnostycznych $\{y_j\}$ (w szczególnym przypadku jednoelementowy) do wyznaczenia testu D_{KS} :

$$D_{KS} = \{y_j\} \quad (15)$$

$$D_{KS} = \{d_j\} \quad (16)$$

gdzie:

d_j – sprawdzenie wartości parametru y_j .

W przypadku określania elementów testu D_{LU} w wyniku realizowanej metody klasyfikacji stanów (podzbiory par stanów S_l, S_i ; $l = \overline{1, k}$; $i = \overline{1, k}$; $i \neq l$) uzyskuje się zbiór parametrów diagnostycznych $\{y_j\}$ do wyznaczenia testu D_{LU} . Wówczas test D_{LU} przyjmuje postać [Surówka 2001, Niziński i Michalski 2002]:

$$D_{LU} = \{y_j\} \quad (17)$$

$$D_{LU} = \{d_j\} \quad (18)$$

Reasumując, należy stwierdzić, że ze względu na preferencję przy wyborze parametrów diagnostycznych metody podobieństwa oraz sposobu badania zależności parametr diagnostyczny – stan, należy wybrać metodę klasyfikacji stanów układu.

PODSUMOWANIE

W opracowaniu przeanalizowano wybrane metody wyboru parametrów diagnostycznych oraz przeprowadzono analizę wybranych metod wyznaczenia testu diagnostycznego kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń. Pozwoliło to na sformułowanie następujących wniosków.

1. Procedurami metodyki diagnozowania układu hydraulicznego maszyny roboczej są:
 - do wyznaczenia zbioru parametrów diagnostycznych należy wybrać **metodę podobieństwa wartości parametrów diagnostycznych** układu;
 - do wyznaczenia testu kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń układów maszyn, ze względu na preferencję przy wyborze parametrów diagnostycznych metody podo-

bieństwa ich wartości oraz sposobu badania zależności parametr diagnostyczny – stan, należy wybrać **metodę klasyfikacji stanów** układu.

2. W celu określenia możliwości zastosowania przedstawionych procedur do diagnozowania układów i zespołów maszyn konieczna jest egzemplifikacja opracowanej metodyki, która powinna obejmować:

- badanie relacji parametr diagnostyczny – stan układu poprzez: - wyznaczenie zbioru stanów układu, - wyznaczenie zbioru parametrów diagnostycznych maszyny, - określenie macierzy relacji parametr diagnostyczny - stan;
- wyznaczenie testu diagnostycznego kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń.

3. Wnioski z egzemplifikacji procedur metodyki diagnozowania stanowić powinny podstawę opracowania koncepcji pokładowego systemu diagnozowania układów maszyn, która powinna zawierać:

- opis systemu (opis hardware i software systemu);
- przebieg procesu wnioskowania diagnostycznego układów maszyn;
- wizualizację wnioskowania diagnostycznego.

4. Opracowana koncepcja pokładowego systemu diagnostycznego powinna być na tyle uniwersalna, aby możliwe było jej wykorzystanie w eksploatacji układów większej grupy maszyn.

LITERATURA

- Niziński S., Michalski R. 2002: Diagnostyka obiektów technicznych. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom.
- Surówka L. 2001: Identyfikacja modelu diagnostycznego układów hydraulicznych. Mechanika, Wydawnictwo ATR, Bydgoszcz.
- Tylicki H. 1998: Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych. Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz.
- Żółtowski B. 1996: Podstawy diagnostyki maszyn. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz.

A METHODOLOGY FOR MACHINE STATE DIAGNOSIS

Summary. The paper presents problems of quality evaluation for machine state tests and diagnostic programs creation. Also, machine state tests and diagnostic programs creation algorithms are proposed.

Key words: technological diagnosis, machine state diagnosing, optimization of a state evaluation process

Recenzent: prof. dr hab. Stanisław Niziński